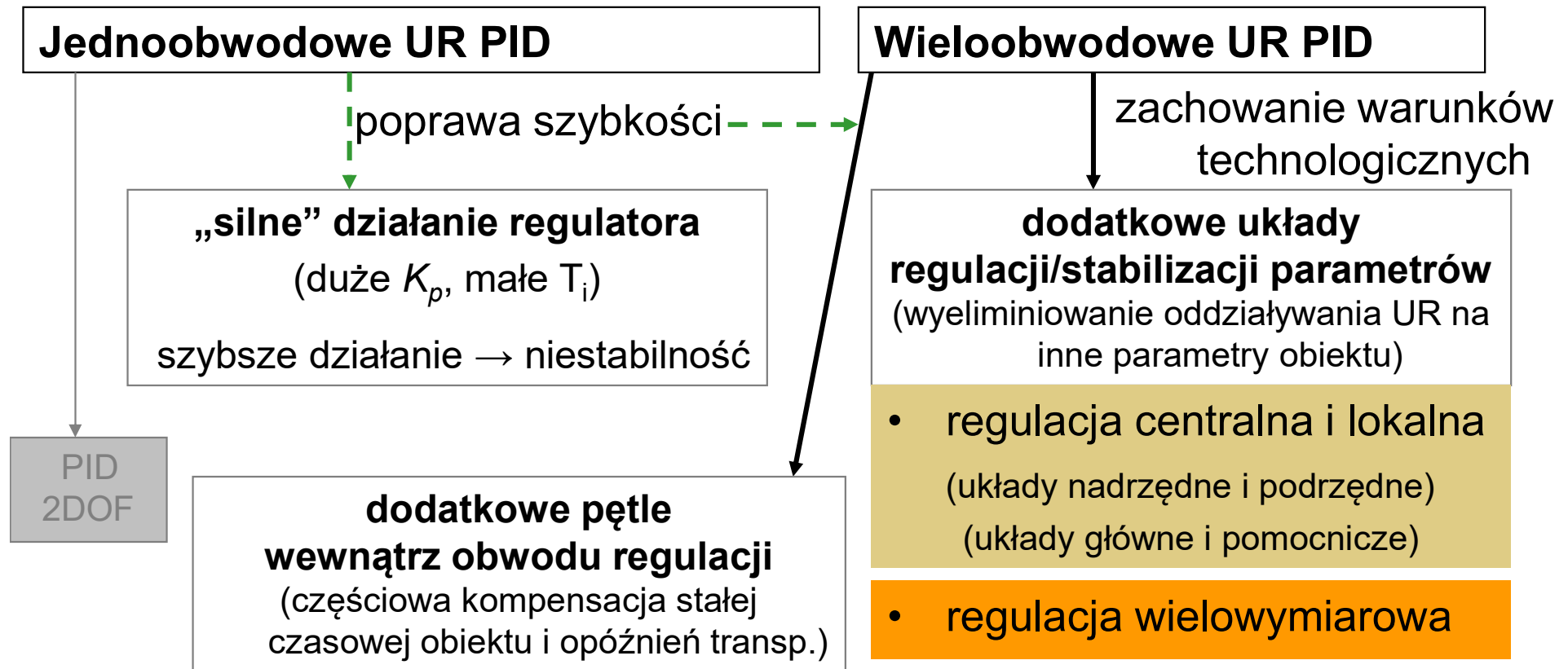


## Projektowanie układów wieloobwodowych (typu „Bottom-Up”)



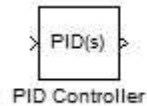
Układy z wielkością pomocniczą:

- regulowaną – **regulacja kaskadowa**
- sterującą
- pomiarem zakłóceń
- wewnątrz regulatora

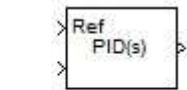
# Regulaor PID z dwoma stopniami swobody (PID 2DOF)

Matlab

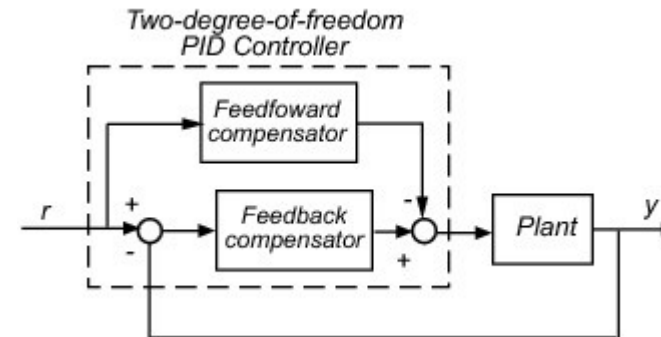
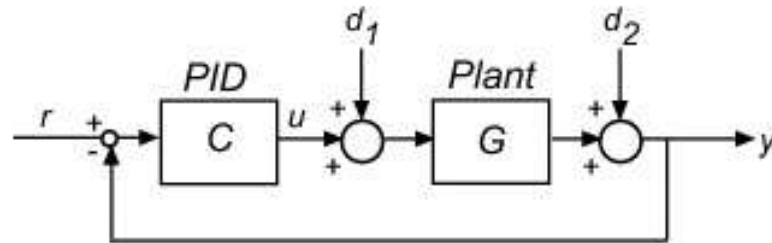
1 lub 2 regulatory (kompensatory)



PID Controller



PID Controller (2DOF)



Two-degree-of-freedom  
PID Controller  
(PID Controller 2DOF)

Feedforward compensator - PD,  
Feedback compensator - PID

Własności:

- płynne śledzenie wartości zadanej
- dobre tłumienie zakłóceń

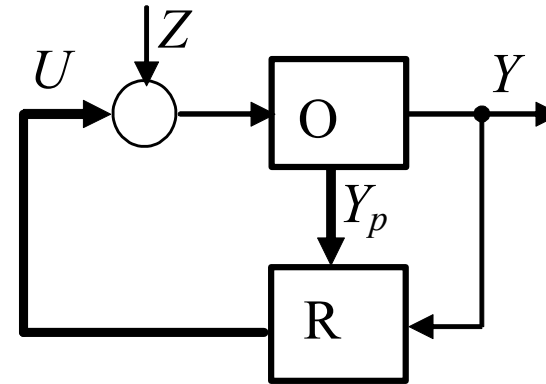
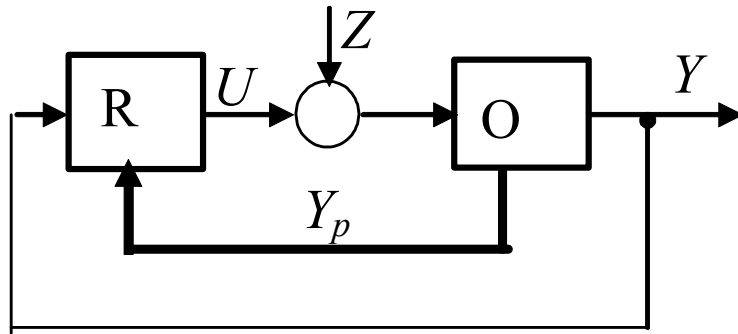
Projektowanie:

- 1) Feedforward – optymalizacja reakcji na zmianę w.zadana
- 2) Feedback – odporność i tłumienie zakłóceń

## Układ z pomocniczą wielkością regulowaną (regulacja kaskadowa)

Idea:

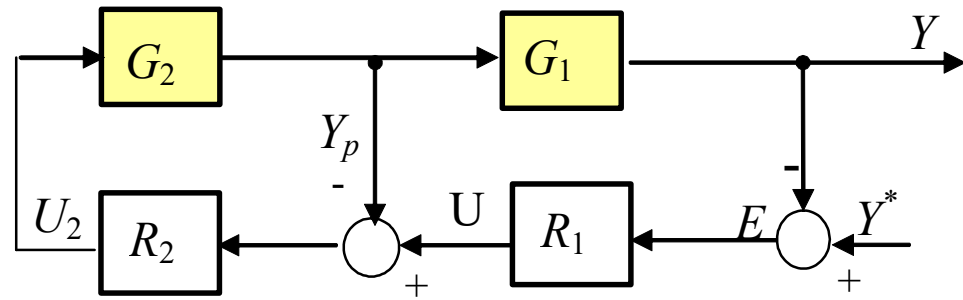
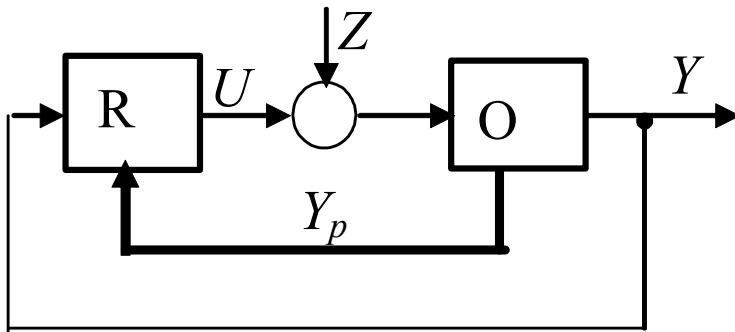
- pomiar pomocniczej wielkości regulowanej  $Y_p$  pobieranej w punkcie o małym opóźnieniu
- wprowadzenie pomocniczego obwodu regulacji, który reaguje szybciej od obwodu głównego



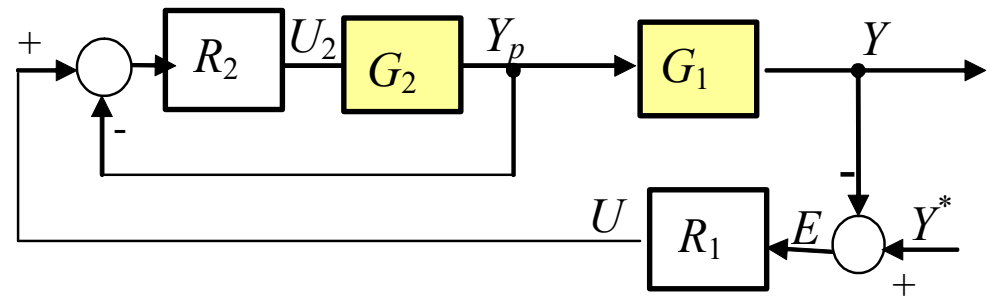
Zastosowanie:

- przyspieszenie regulacji
  - częściowa kompensacja stałej czasowej obiektu i opóźnień transp
  - poprawa stabilność regulacji w stosunku do pojedynczej pętli
- kompensacja wpływu zakłóceń
- linearyzacja charakterystyki statycznej

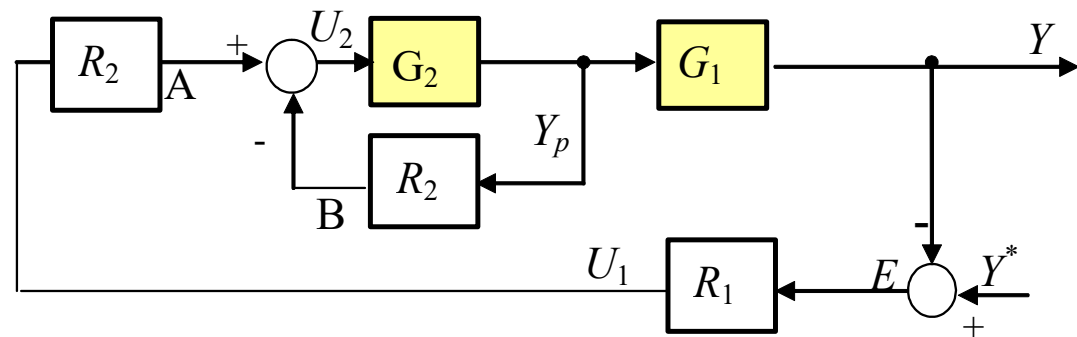
# Układ z pomocniczą wielkością regulowaną (regulacja kaskadowa)



Sprzężenie korekcyjne  $R_2$



Zał.: liniowe  $R_2$

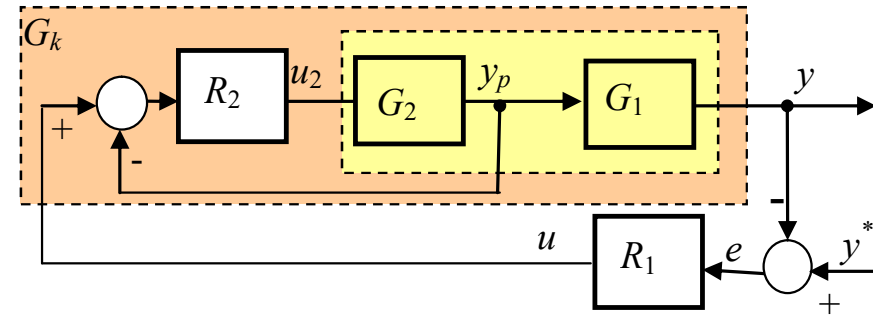


## Układ z pomocniczą wielkością regulowaną (regulacja kaskadowa)

### 1) Neutralizacja własności dynamicznych części obiektu $G_2$ (korekcja)

Zał.: Liniowe  $R_2$  i  $G_2$

$$\frac{Y(s)}{U_1} = G_1(s) \frac{R_2(s)G_2(s)}{1 + R_2(s)G_2(s)}$$



- w paśmie częstotliwości, w którym  $|R_2(j\omega)G_2(j\omega)| \gg 1$

jest  $\frac{Y(s)}{U_1} \approx G_1(s)$  (własności części  $G_2$  są „zneutralizowane”)

Dobór regulatorów i nastaw:

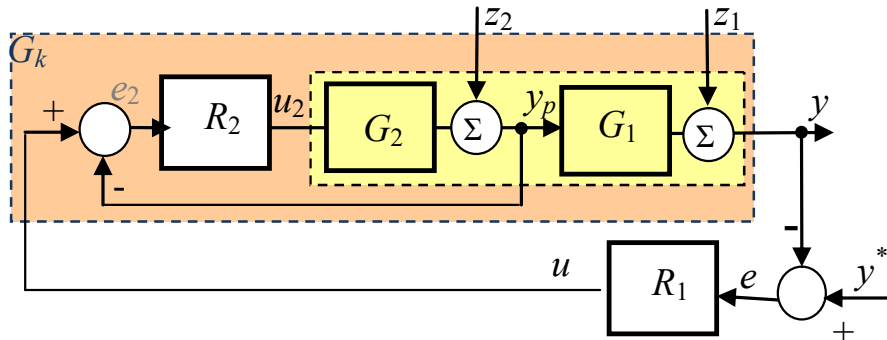
- regulator pomocniczy  $R_2$ 
  - wystarczy P (niezerowy uchyb nie ma znaczenia),
  - możliwie duże wzmocnienie (aby  $|R_2G_2| \gg 1$ )
- regulator główny  $R_1$  – zwykle PI (analogicznie jak w układach jednoobwodowych).

# Układ z pomocniczą wielkością regulowaną (regulacja kaskadowa)

## 2) Kompensacja zakłóceń

Zał.: dwa rodzaje zakłóceń

- $Z_2$  – przed miejscem pomiaru (wpływają na  $Y_p$ )
- $Z_1$  – wpływają na  $Y_p$  dopiero po przejściu całego obwodu

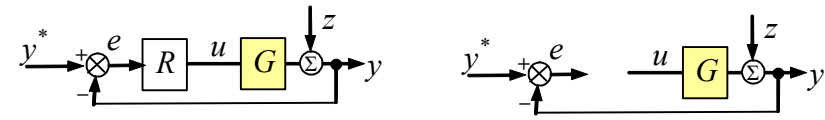


$$G_k(s) = \frac{Y(s)}{U_1} = G_1(s) \frac{R_2(s)G_2(s)}{1 + R_2(s)G_2(s)}$$

Dla  $Z_1$  jest:  $q_1(j\omega) = \frac{1}{1 + R_1(j\omega)G_k(j\omega)} = \frac{1}{1 + R_1(j\omega)G_1(j\omega)} \frac{R_2(j\omega)G_2(j\omega)}{1 + R_2(j\omega)G_2(j\omega)}$

Dla  $Z_2$  jest:  $q_2(j\omega) = q_1(j\omega) \frac{1}{1 + R_2(j\omega)G_2(j\omega)}$

zakłócenia  $Z_2$  są kompensowane  $(1+R_2G_2)$  razy silniej niż  $Z_1$



$$e = \frac{1}{1 + RG} y^* - \frac{1}{1 + RG} z$$

$$e = y^* - z$$

$$e = e_{y^*} - e_z$$

Badamy wskaźnik jakości  $q$

(ile razy zmniejsza się uchyb od zakłóceń po wprowadzeniu regulatora)

$$\frac{e_{z_k,R}(j\omega)}{e_{z_k,B}(j\omega)} = \frac{z(j\omega)}{1 + R(j\omega)G(j\omega)} \frac{1}{z(j\omega)} = \frac{1}{1 + R(j\omega)G(j\omega)}$$

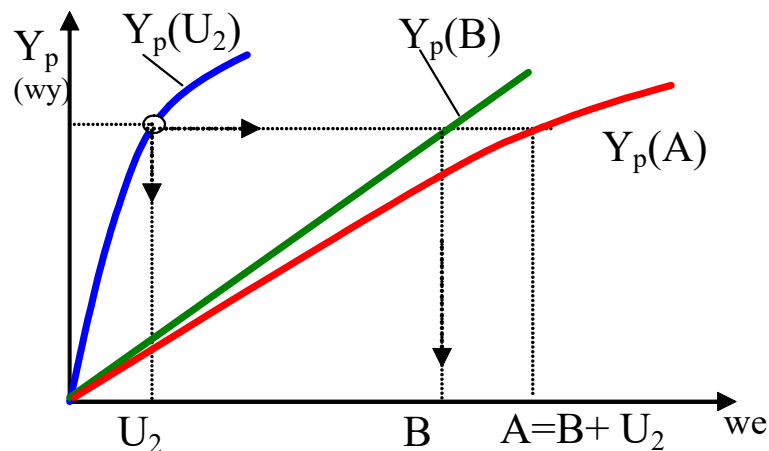
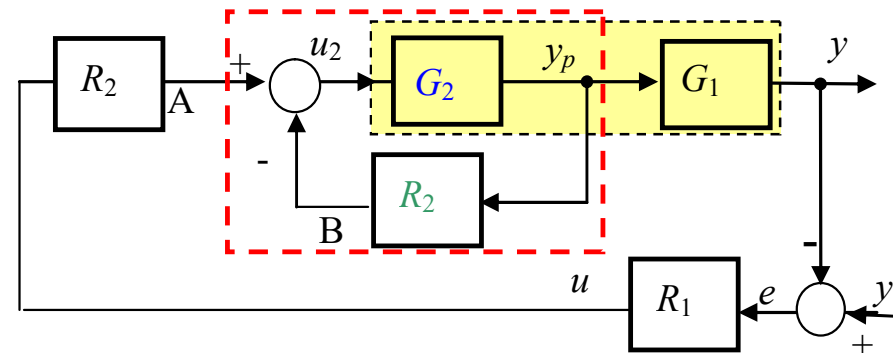
## Układ z pomocniczą wielkością regulowaną (regulacja kaskadowa)

### 3) Linearyzacja charakterystyki statycznej obiektu

Zał.:

$G_2$  nieliniowe

$R_2 = K_{p2}$  (wystarczy  $K_{p2} > 0$ )



ch-ki pierwotne:

$Y_p(U_2)$  – ch-ka członu  $G_2$

$Y_p(B)$  – odwrócona ch-ka regulatora  $R_2 = K_{p2}$

$A = B + U_2$  – węzeł sumacyjny  $U_2 = A - B$

ch-ka wypadkowa (zlinearyzowana)

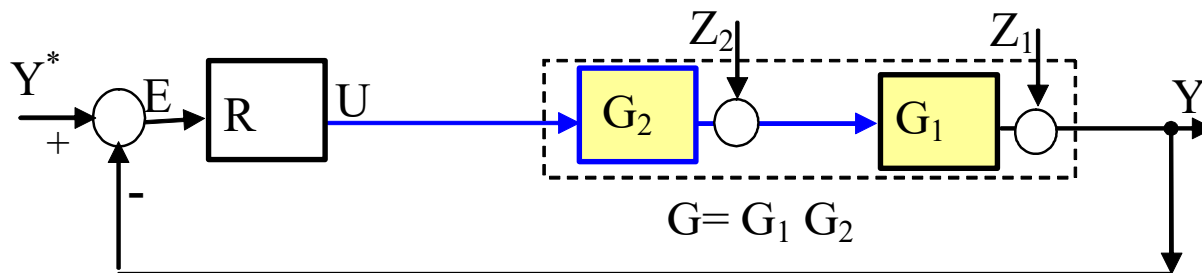
$Y_p(A) = Y_p(B + U_2)$

Sposób wyznaczenia ch-ki wypadkowej:

- 1) dla każdego  $Y_p$  odczytać  $U_2$
- 2) dla każdego  $Y_p$  odczytać  $B$
- 3) dla każdego  $Y_p$  rysujemy  $A = B + U_2$

## Układ z pomocniczą wielkością regulowaną (regulacja kaskadowa)

*Matlab:* Dobór nastaw wspomagany przez pidtune



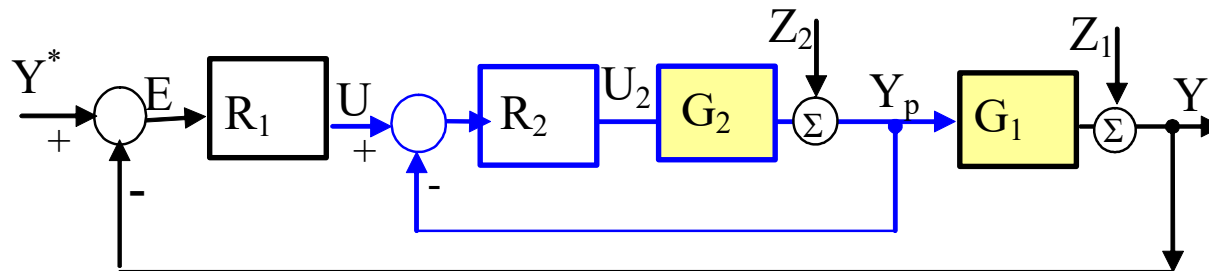
Pojedyncza pętla regulacji

G1 = ...

G2 = ...

opcje =

R=pidtune(G1\*G2, 'PI', opcje)



Regulacja kaskadowa

G1 = ...

G2 = ...

opcje1 =

R2=pidtune(G2, 'P', opcje1)

obiektK = feedback(G2\*R2,1)

opcje =

R1=pidtune(obiektK\*G1, 'PI', opcje)

Porównanie własności pojedynczej pętli (sys1\*) i kaskady (sys2\*):

Zmiana w.zadanej:

sys1y = feedback(G1\*G2\*R,1)

sys2y = feedback(R1\*obiektK\*G1,1)

step(sys1y,'r', sys2y,'b')

Reakcja na zakłócenie Z<sub>1</sub>:

sys1z1 = feedback(G1,G2\*R)

sys2z1 = G1/(1+G2\*R2+G1\*G2\*R1\*R2)

step(sys1z1,'r', sys2z2,'b')



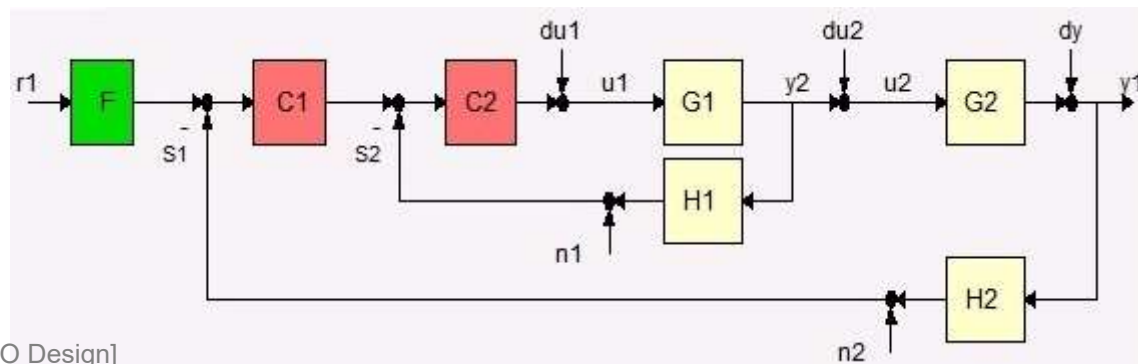
# Układ z pomocniczą wielkością regulowaną (regulacja kaskadowa)

**Matlab:** SISO Design Tool dla LTI (obiekt LTI)

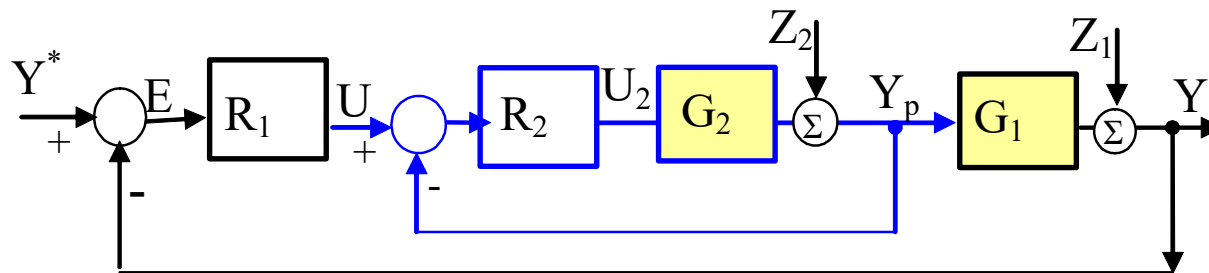
**Wywołanie:** `sisotool(obiekt_lti, regulator)`  
`sisotool(obiekt_lti)`  
`sisotool()`

*obiekt\_lti* = model obiektu (bez regulatora)  
*regulator* = model regulatora

**Struktura:**



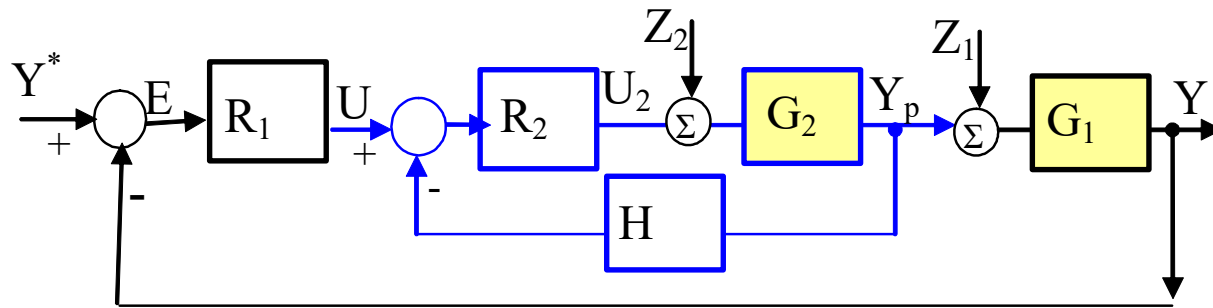
[SISO Design]



[dokumentacja Matlab:  $Z_1, Z_2$  – zakłócenia wyjściowe ( $dy$ )]

# Układ z pomocniczą wielkością regulowaną (regulacja kaskadowa)

Wyznaczanie parametrów regulatorów układu kaskadowego metodami reduktów i przybliżenia Padégo



$$\begin{cases} e = y^* - y \\ u = eR_1 \\ e_2 = u - y_p \\ u_2 = e_2R_2 \\ y_p = u_2G_2 + z_2 \\ y = y_pG_1 + z_1 \end{cases}$$

$$y = \frac{R_1R_2G_1G_2}{M} y^* + \frac{G_1G_2}{M} z_2 + G_1 \frac{1 + HR_2G_2}{M} z_1$$

$$M = 1 + HR_2G_2 + R_1R_2G_1G_2$$

Założenia:

$$G_1 = \frac{k_1}{T_1s + 1} e^{+sT_0} \approx \frac{k_1}{T_1s + 1} \frac{b_1s + b_0}{a_2s + a_0} = \frac{L_1}{M_1}$$

$$G_2 = \frac{k_2}{T_2s + 1} = \frac{L_2}{M_2}$$

$$R_1 = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = \frac{L_{R1}}{M_{R1}}$$

$$R_2 = K_{p2} = \frac{L_{R2}}{M_{R2}}$$

$$H = h$$

$$z_1 = z_2 = 0$$

$$G_z = \frac{y}{y^*} = \frac{R_1R_2G_1G_2}{M} = \frac{L_1L_2L_{R1}L_{R2}}{M_1M_2M_{R1}M_{R2} + hL_{R1}L_{R2}M_1M_{R1} + L_1L_2L_{R1}L_{R2}}$$

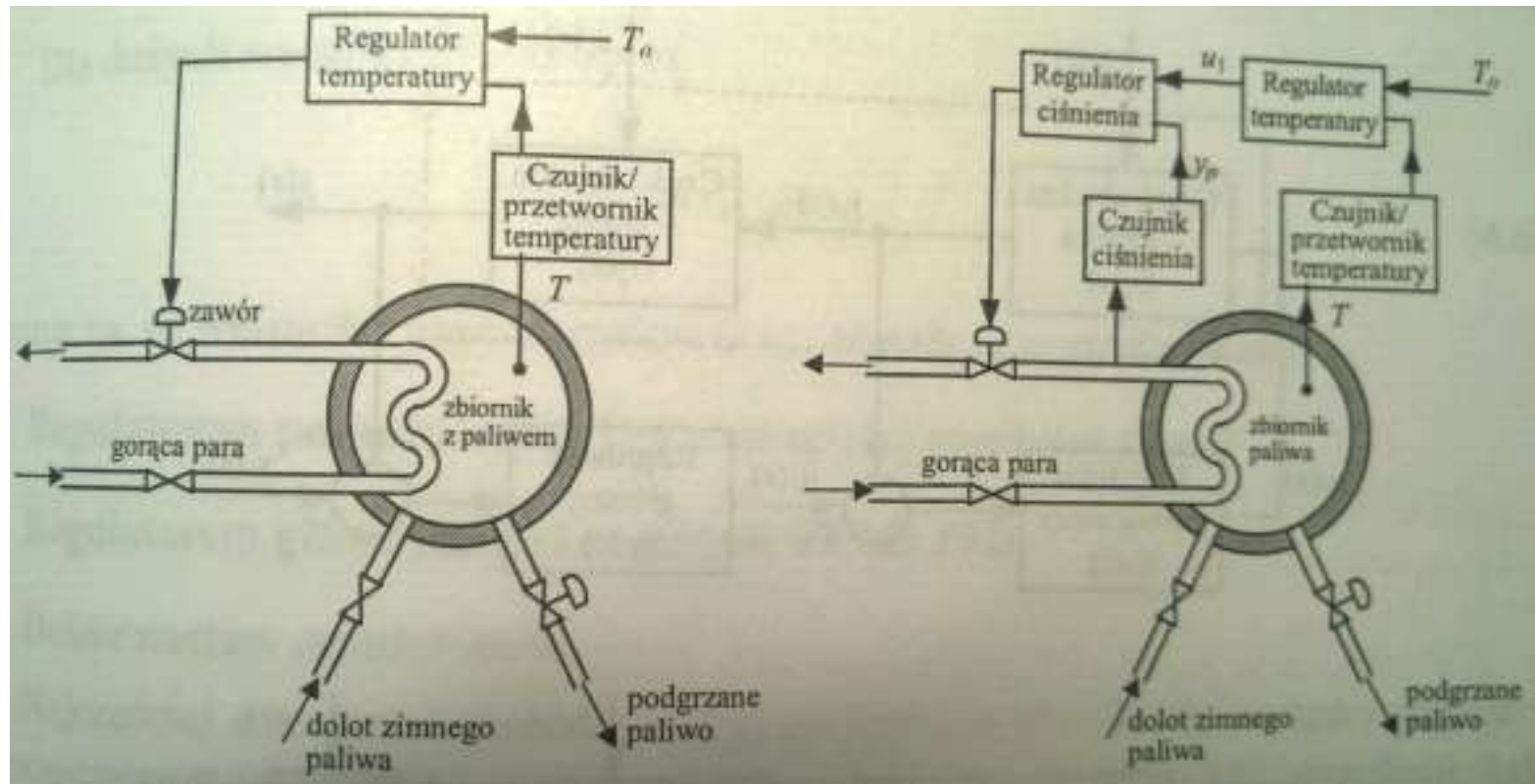
$$G_z = \frac{c_3s^3 + c_2s^2 + c_1s + c_0}{d_4s^4 + d_3s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0}$$

- Rozwinięcie w ułamek łańcuchowy V.
- Wybranie reduktu.
- Porównanie współczynników reduktu i transmitancji o założonych (oczekiwanych) wartościach

Uwaga: 1)  $Z_2, Z_1$  – zakłócenia wejściowe (tak jak w Matlabie  $du_2, du_1$ ), 2) u Halawy inne oznaczenia  $i_z$  na rys. powyżej

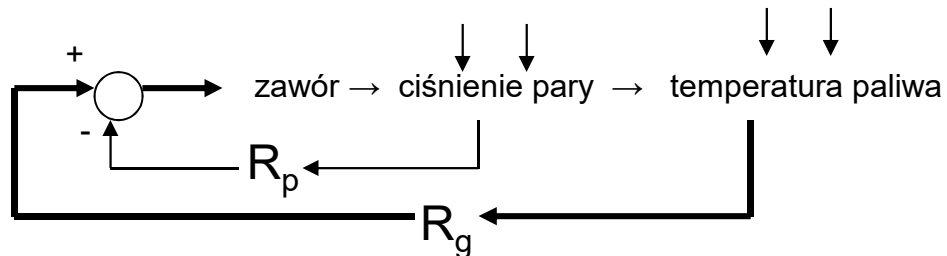
# Układ z pomocniczą wielkością regulowaną (regulacja kaskadowa)

Przykład – układ podgrzewania paliwa



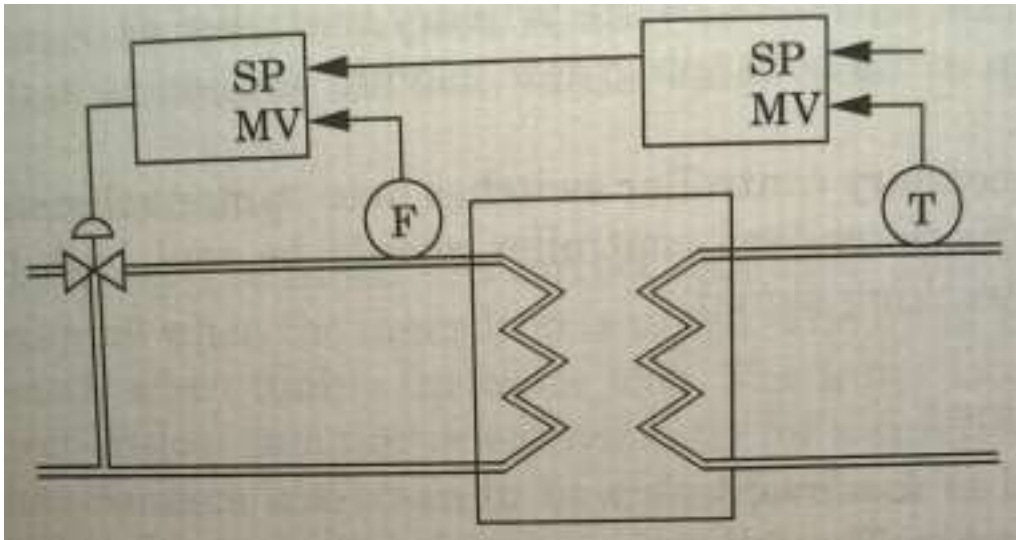
-zmiany ciśnienia pary wpływają na temperaturę paliwa  
-to powoduje reakcję regulatora temperatury

- zmiany ciśnienia pary są widoczne „od razu” i koryguje przez regulator (stabilizator) ciśnienia



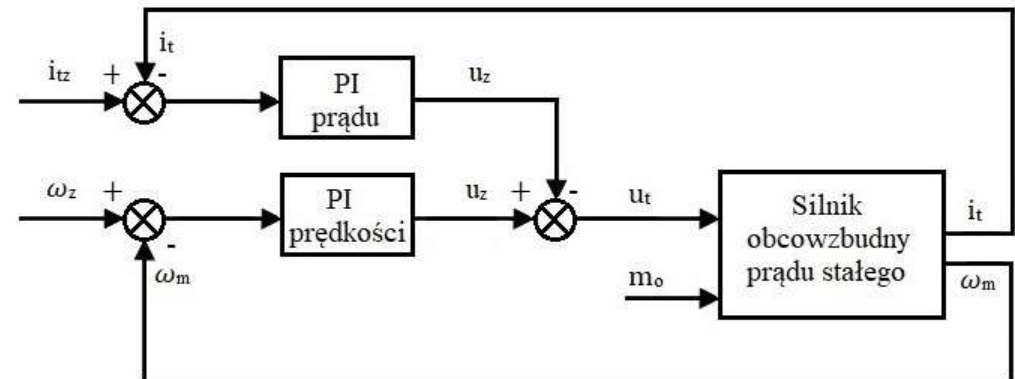
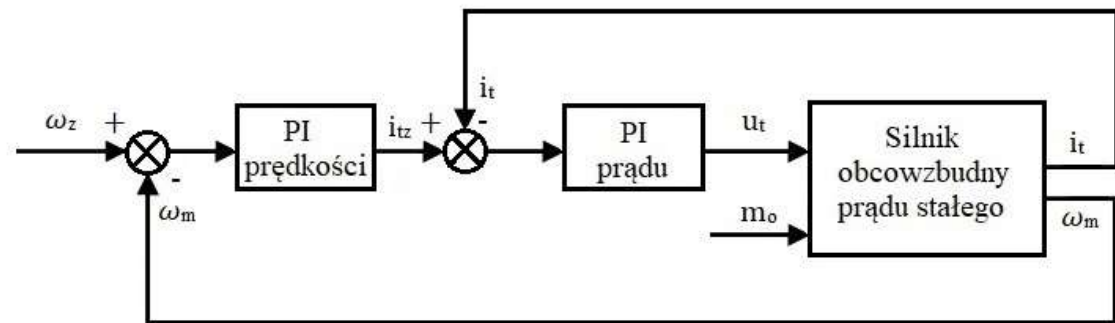
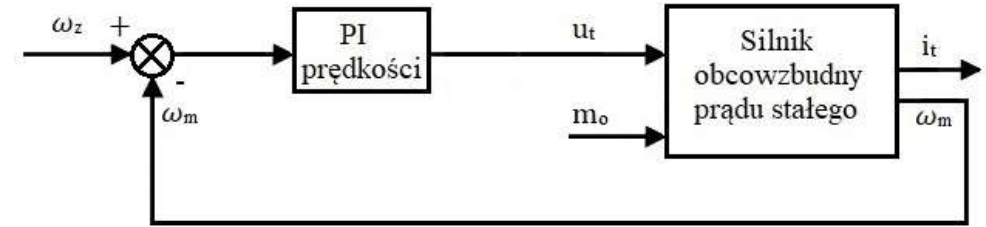
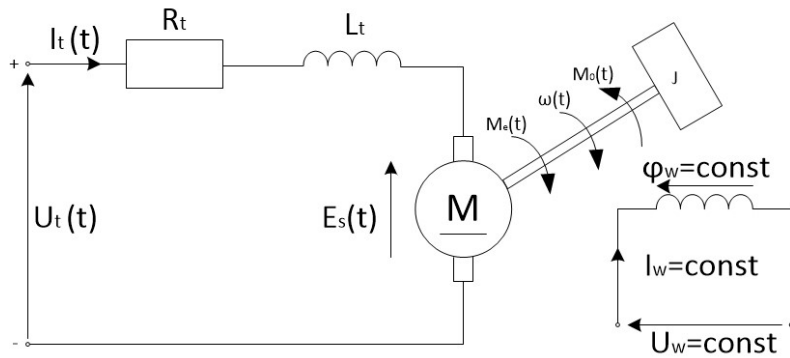
## Układ z pomocniczą wielkością regulowaną (regulacja kaskadowa)

Przykład – wymiennik ciepła z regulacją temperatury

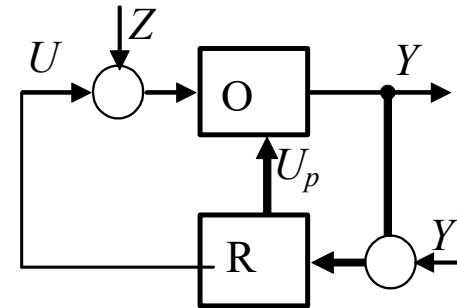
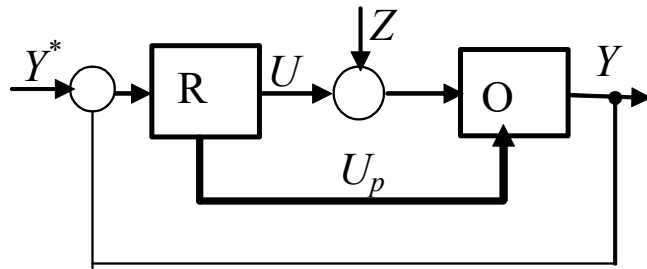


# Układ z pomocniczą wielkością regulowaną (regulacja kaskadowa)

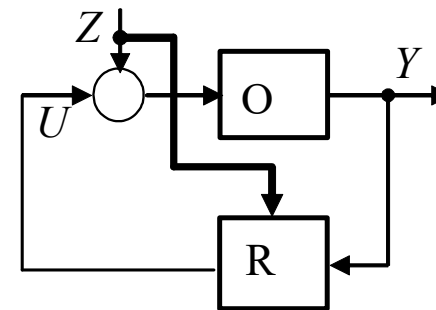
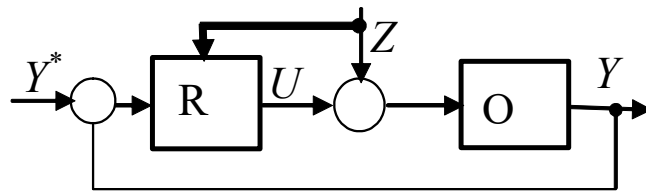
## Przykład – silnik DC



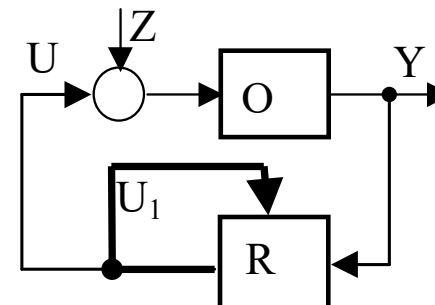
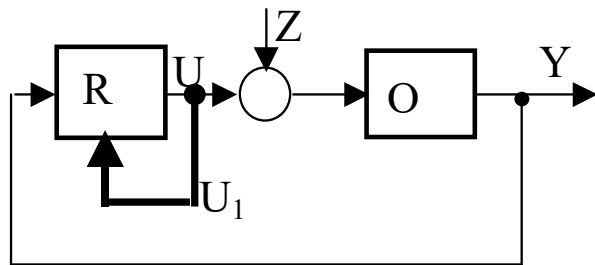
## Układ z pomocniczą wielkością sterującą



## Układ z pomocniczym pomiarem zakłóceń



## Układ z pomocniczym sprzężeniem wewnątrz regulatora (z korekcją)



## Wielowymiarowe układy regulacji

Regulacja kilku współzależnych wielkości,

np.:

- regulacja prędkości, momentu obrotowego i mocy silnika
- regulacja zespołu generator napięcia z turbiną gazową (prędkość obrotowa turbin, napięcie na zaciskach generatora)
- regulacja częstotliwości, napięcia, mocy czynnej i bienej w systemie energetycznym

Sprzężenia skrośne pomiędzy układami regulacji,

np.:

- silnik – zależność prędkości obrotowej i momentu obrotowego  
zmiana zadanej prędkości obrotowej wpływa też na moment obrotowy  
zmiana zadanego momentu obrotowego wpływa na zmianę prędkości obrotowej
- generator-turbina – zależność częstotliwości i napięcia

# Złożone układy regulacji

Omawiane układy wieloobwodowe

- Kilka (np. 2) pętli regulacji – w każdej pętli regulator
- Określone struktury - można wyróżnić wewnętrzną i zewnętrzną pętlę regulacji
- Zastosowanie klasycznych metod projektowania PID w odpowiedniej kolejności

W odróżnieniu od:

- regulacji złożonej (wieloparametrowej)
  - jeden główny cel (wartość procesowa)
  - kilka współzależnych wartości procesowych
- sterowania w przestrzeni stanów – jedno główne sterowanie

## Projektowanie złożonych systemów sterowania

- podjęcie „Bottom-Up”
  - podział systemy na oddzielne części
  - zasady sterowania: feedback, feedforward, MFC, cascade control
    - repetitive control, mid-range control, split-range control, ratio control, selector control
  - zalety: projektowanie i strojenie pętla po pętli
  - wady: problemy przy interakcji pętli
- podjęcie „Top-Down”
  - punktem wyjścia jest często problem optymalizacyjny
  - techniki: optymalizacja, state feedback, observers, predictive control, linearyzacja
  - przy działaniu jednocześnie na wielu wejściach i wyjściach

Interaakcja pętli - [PID Controller, Astrom/7.8]

Inwariantność [Brzózka/4.8.8]



# Ciepłownie – układy hydrauliczne

